

І. А. АЛЕКСЕЄВ, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
О. В. САДОВОЙ, д-р техн. наук, проф., прорек., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
А. І. ТРИКІЛО, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ;
М. В. БАБЕНКО, канд. техн. наук, доц., ДДТУ, Дніпродзержинськ

ПРЕЦИЗІЙНИЙ ГЕНЕРАТОР ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОМПЛЕКСІВ ОДНОДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Наведений приклад побудови прецизійного генератора робочої частоти на базі чипу AD 9832 компанії Analog Devices, що реалізує метод прямого цифрового синтезу (DDS) та інвертора напруги, який ним керується, для живлення високочастотних кіл системи однодротової передачі електричної енергії, які підтримують функцію динамічної зміни та установки робочої частоти за цифровим каналом керування. Це дозволило досягти у прецизійному генераторі живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії лінійної навантажувальної характеристики при ККД більше 90 %.

Ключові слова: частота, генератор, DDS-синтез, високочастотний, однодротова, передача, енергія, система, цифрова, живлення.

Вступ. Більше ста років тому Нікола Тесла опублікував результати своїх дослідів з резонансного метода передачі електричної енергії [1, 2]. Першим на території СНД однодротову систему передачі електричної енергії впровадив «Газпром» (Росія) і спонсорував виготовлення відповідної установки потужністю 20 кВт[3]. Уздовж газопроводів технологічно прокладають лінії електропередачі для катодного захисту, живлення насосів для перекачування та інших експлуатаційних служб. При однодротовій передачі енергії стало можливим протягнути сталевий дріт, а на деяких ділянках газопроводу навіть здійснити передачу енергії по самій трубі. За результатами експлуатації такої системи отримали в сотні разів кращі електричні параметри (ККД більше 90%), ніж для традиційних двопровідних та трипровідних.

Мета роботи. Основною метою даної роботи є розробка методики побудови прецизійного генератора робочої частоти та інвертора напруги, який ним керується, для підсистем живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії, що підтримують функцію цифрової установки робочої частоти.

Постановка завдання. Попередньо проведені в лабораторних умовах кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпродзержинського державного технічного університету експериментальні дослідження однодротової резонансної системи передачі електричної енергії показали, що для стійкого її функціонування в області високого сумарного ККД необхідно підтримувати робочу частоту комплексу в межах $270 \text{ кГц} \pm 100 \text{ Гц}$ [4,5]. Крім того, в реальних умовах експлуатації необхідним є наявність функції автоматичного вибору робочої частоти в залежності від зміни параметрів навантаження та електричних характеристик каналу передачі енергії.

Матеріал і результати роботи. Прямий цифровий синтез (DDS) - метод, що дозволяє отримати аналоговий сигнал за рахунок генерації тимчасової послідовності цифрових відліків для їх подальшого перетворення в аналогову форму за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). DDS унікальний своєю цифровою визначеністю: сигнал, що генерується ним, синтезується з властивою цифровим системам точністю [6,7]. Частота, амплітуда і фаза сигналу в будь-який момент часу точно відомі і контрольовані.

На рис. 1 показана функціональна схема синтезатора DDS: його основними вузлами є накопичувач значення фази (акумулятор фази), засіб перетворення значення фази в амплітуду (зазвичай це постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП) з табличними значеннями функції синуса) і ЦАП. Частота вихідного сигналу визначається двома параметрами: частотою тактового сигналу і двійковим числом, записаним у регістр частоти. Це двійкове число подається на вхід акумулятора фази. Якщо використовується ПЗП з табличними значеннями синуса, то акумулятор фази обчислює адресу (відповідає миттєвому значенню фази) і подає його на вхід ПЗП, при цьому на виході ПЗП отримуємо поточне значення амплітуди в цифровому вигляді.

Для генерації синусоїди з фіксованою частотою постійна величина (приріст фази, обумовлений двійковим числом, записаним у регістр частоти) додається до значення, що зберігається в акумуляторі фази, з кожним імпульсом тактового сигналу.

Якщо значення приросту велике, акумулятор фази буде швидко пробігати всю таблицю синуса, що зберігається в ПЗП, і частота сигналу при цьому буде висока. Якщо значення приросту фази мале, акумулятору фази знадобиться більше кроків, щоб пройти всю таблицю ПЗП, і відповідно частота сигналу на виході буде низькою (рис. 2).

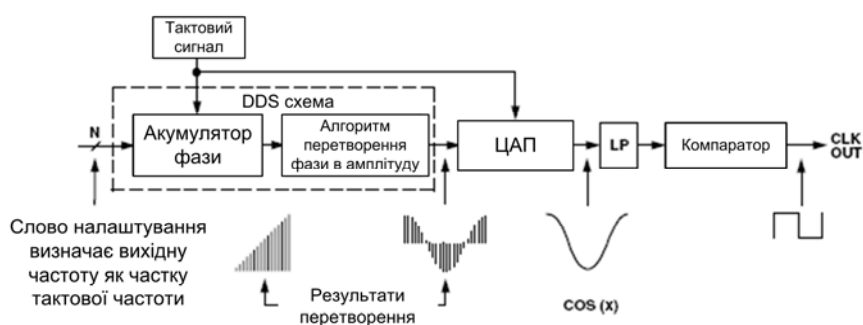


Рис. 1 – Блок схема типового DDS - синтезатора частоти

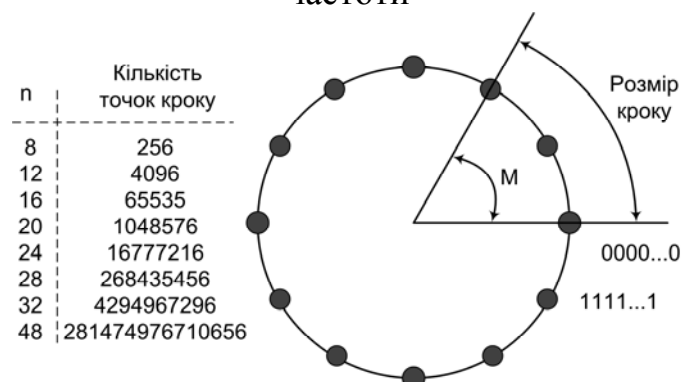


Рис. 2 – Циклічний розрахунок фази DDS - синтезатора частоти

Принципова схема розробленого генераторного блоку наведена на рис. 3. Схема побудована на базі мікроконтролера ATmega8.

Для тактування DDS-синтезатора AD9832 використовується генератор стабільної частоти, побудований на мікросхемі К531ГГ1[8], яка являє собою два вбудованих генератора імпульсів, частота яких визначається або p'езо

резонатором, що підключається до виводів C1 та C2, або конденсатором, який підключається замість резонатора. В останньому випадку з'являється можливість змінювати частоту генерації шляхом зміни напруг, що прикладені до виводів Uд та Uч. У наведеній схемі частота імпульсів визначається кварцовим резонатором та складає 8 МГц.

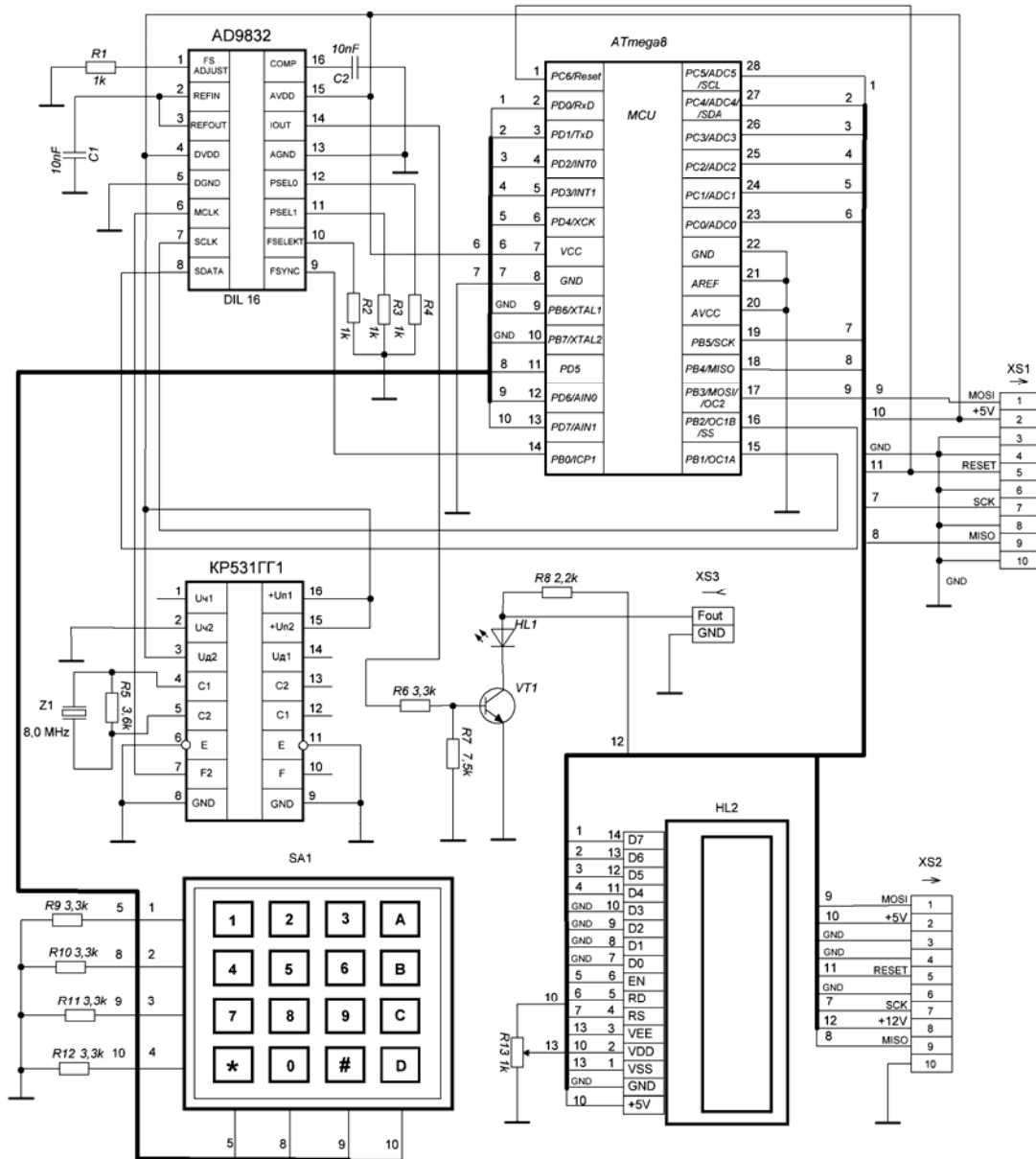


Рис. 3 – Принципова схема генераторного блоку на базі DDS-синтезатора AD9832

Клавіатура призначена для введення користувачем початкового значення робочої частоти, яка відображається на LCD дисплеї. Після натискання кнопки «*» мікропроцесор перепрограмує DDS-синтезатор AD9832.

Програмно алгоритм запису частоти має наступний вигляд.

1. Ініціалізація мікроконтролера і портів введення / виведення:

- Сигнали на виводах AD 9832: ($DDS_FSYNC = 1$, $DDS_SCLK = 0$, $DDS_SDATA = 0$)

- Виконуємо затримку на кілька десятків мілісекунд (підбирається експериментально) щоб дати можливість стабілізуватися живленню на DDS (там зазвичай ставлять конденсатори великої ємності) і тактовому генератору вийти в робочий режим.

2. Ініціалізація DDS.

- Виконуємо програмне скидання AD9832:

($SLEEP = 1$, $RESET = 1$, $CLR = 1$: $0b1111|1дю000|0000|0000 = 0xf800$;

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо старший байт $0b11111000$ (порядок біт - MSB - від старшого до молодшого);

- передаємо молодший байт $0b00000000$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

3. Перший раз встановлюємо значення вихідної частоти:

Частота розраховується наступним чином:

$$F_{OUT} = \frac{FREG0 \cdot Fmclk}{2^{32}} \quad (1)$$

де: F_{OUT} - частота на виході DDS, Гц (200000 Гц в цьому прикладі), $FREG0$ - значення регістра, що визначає частоту (32 біт), $Fmclk$ - тактова частота DDS, Гц (8 МГц у цьому прикладі) $2^{32} = 4\,294\,967\,296$.

Вирішуючи рівняння щодо $FREG0$, знаходимо:

$$FREG0 = (F_{OUT} / Fmclk) \cdot 2^{32} \quad (2)$$

$$FREG0 = (200000 / 8000000) \cdot 2^{32} = 1476395008 = 0x66666666 \quad (3)$$

Пишемо старший (3-й) байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00110011$ (вибір 3-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0101|1000 = 0x66$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо 2-й байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00100010$ (вибір 2-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо 1-й байт $FREG0$:

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00110001$ (вибір 1-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

Пишемо молодший (0-й) байт $FREG0$

- $DDS_FSYNC = 0$;

- передаємо байт $0b00100000$ (вибір 0-го байта з $FREG0$);

- передаємо байт $0b0000|0000 = 0x00$;

- $DDS_FSYNC = 1$.

4. Переводимо DDS в оперативний режим ($SLEEP = 0$, $RESET = 0$, $CLR = 0$);

- $DDS_FSYNC = 0$;
- передаємо старший байт 0b1100|0000;
- передаємо молодший байт 0b00000000;
- $DDS_FSYNC = 1$.

Після останньої команди DDS видає на виході 200000 Гц. Надалі при перебудові DDS виконуються тільки пункти 3-4.

На рис. 4 наведено принципову схему інвертора напруги побудованого на базі чипу IR2111. Даний чип є високошвидкісним, високовольтним драйвером для MOSFET та IGBT транзисторів, що включені за схемою напівмостового інвертора напруги. Драйвери International Rectifier мають ряд важливих функцій: захист від короткого замикання (Short Circuit Protection), захист від перевантаження по струму (Overcurrent Protection), захист від замикання затворів при низьких напругах живлення та керування (Under Voltage LockOut UVLO).

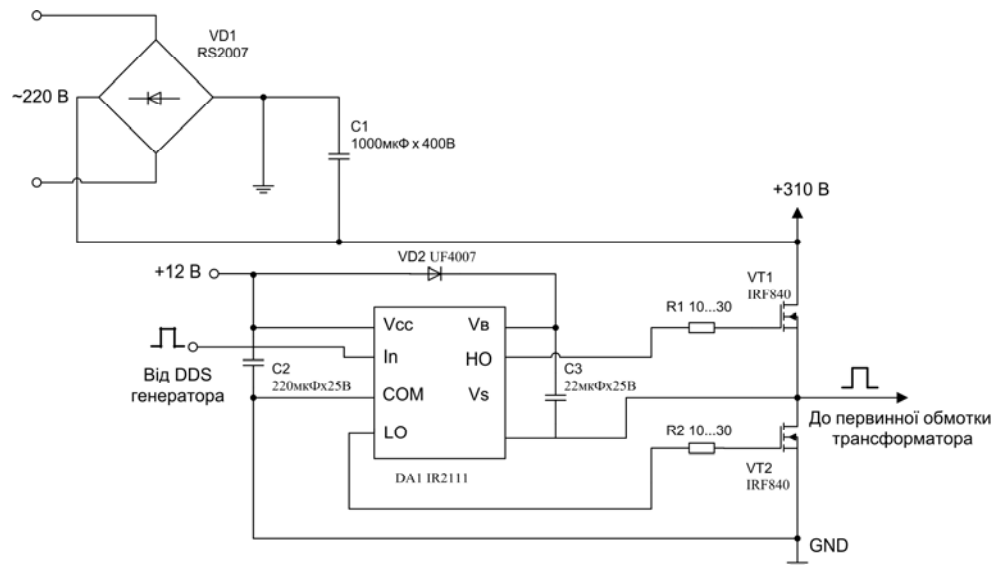


Рис. 4 – Принципова схема інвертора напруги

На вхід In драйвера надходить сигнал з DDS-генератора, в такт з яким здійснюється почергове вмикання та вимикання ключів VT1 та VT2. Діод VD2 та конденсатор C3 разом утворюють бутстрепну схему керування верхнім ключем VT1. Для цього діод VD2 обов'язково повинен бути ультрашвидким, а конденсатор C3 бажано використовувати танталовий.

Експериментальні дослідження розробленого прецизійного генератора живлення для системи однодротової передачі електричної енергії підтвердили його працездатність в діапазоні частот від 0 до 350 кГц (верхня межа обмежується можливостями драйвера IR2111) з точністю до ± 1 Гц при майже лінійній навантажувальній характеристиці та ККД у межах 91–95 %.

Висновки

1. Використання DDS-синтезатора частоти дозволяє побудувати прецизійний генератор з унікальною цифровою визначеністю: сигнал, що генерується ним, синтезується з властивою цифровим системам точністю. Частота і фаза сигналу в будь-який момент часу точно відомі і контрольовані. Генератори, побудовані на базі DDS, практично не схильні до температурного дрейфу і старіння.

2. Використання сучасних методів синтезу та електронних компонентів дозволило досягти у прецизійному генераторі живлення високочастотних кіл комплексу однодротової передачі електричної енергії лінійної навантажувальної характеристики при ККД більше 90 %.

Список літератури: 1. *Тесла Н.* Статті [Текст] / [наук. ред. *Абрамович В.* та ін.]. – Самара: Издательский дом «Агни», 2008. – 584 с.: іл. - ISBN 978-5-89850-078-8. 2. *Тесла Н.* Колорадо-Спрингс. Дневники. 1899-1900 [Текст] / [наук. ред. *Абрамович В.* та ін.]. – Самара: Издательский дом «Агни», 2008. – 460 с.: іл. - ISBN 978-5-89850-100-6. 3. *Стребков Д. С.* Резонансные методы передачи электрической энергии / *Д. С. Стребков, А. И. Некрасов* Под редакцией академика РАСХН *Д. С. Стребкова*. Издание второе. – Москва: ВИАЭСХ, 2006. – 304 с. - ISBN 978-5-85941-134-4. 4. *Садовой А. В.* Исследование параметров резонансных трансформаторов в системе однопроводной передачи электрической энергии [Текст] / *А. В. Садовой, И. А. Алексеев, А. И. Трикило* // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (технічні науки)/Дніпродзержинськ: ДДТУ.-2011. – Випуск 2(17). – С.181-185. 5. *Садовой А. В.* Экспериментальные исследования параметров резонансных трансформаторов в системе однопроводной передачи электрической энергии [Текст] / *А. В. Садовой, И. А. Алексеев, А. И. Трикило* // Журнал электротехнические и компьютерные системы. – Київ : - 2014. - № 15(91). – С.367-369. 6. *Мёрфи Е.* Все о синтезаторах DDS [Текст] / *Мёрфи Е., Слэттери К.* // Журнал компоненты и технологии. – Санкт-Петербург : - 2005. - № 1. – С.21-25. 7. Direct Digital Synthesis (DDS) & Modulators [Electronic resource] // Official website of the company International Rectifier. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/products/index.html#>. - Last access: 2014. – Title from the screen. 8. *Бирюков С. А.* Применение интегральных микросхем серий TTL [Текст] / *С. А. Бирюков*, - М. : «Патриот», 1992. – 117 с. 9. *Мэк Р.* Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению [Текст] / *Мэк Р.* – Пер. с англ.-М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008.- 272 с.: ил. ISBN 978-5-94120-172-3. 10. *Семенов Б. Ю.* Силовая электроника: от простого к сложному [Текст] / *Б. Ю. Семенов*. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с. : ил. (Серия «Библиотека инженера»). - ISBN 5-98003-223-1.

Bibliography (transliterated): 1. *Abramovich V. Tesla N.* Stat'I [Tesla N. Articles], (2008), Moskow, Russian Federation, Agni Publishing House, 584 p. (In Russian). 2. *Abramovich V. Tesla N.* Kolorado-Springs. Dnevniky. 1899-1900 [Tesla N. Kolorado-Springs. Diary. 1899-1900], (2008), Moskow, Russian Federation, Agni Publishing House, 460 p. (In Russian). 3. *Strebkov D. S.* Rezonansnye metody peredachi elektricheskoi energii [Resonance methods of electric power transmission], (2008), Moskow, Russian Federation, 304 p. (In Russian). 4. *Sadovoi A. V., Alekseev I. A., Trikiло A. I.* Issledovanie parametrov rezonansnykh transformatorov v sisteme odnoprovodnoi peredachi elektricheskoi energii [Research of parameters of resonant transformers in the system of single-wire power transmission], (2011), Zbirnik naukovikh prats' Dniprodzerzhyn'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu: (tekhnichni nauki), Dniprodzerzhyn'sk, Ukraine, Vol. 2(17), pp. 181 – 185 (In Russian). 5. *Sadovoi A. V., Alekseev I. A., Trikiло A. I.* Eksperimental'nye issledovaniya parametrov rezonansnykh transformatorov v sisteme odnoprovodnoi peredachi elektricheskoi energii [Experimental research of resonant transformers in the system of single-wire electric power transmission], (2014), Zhurnal elektrotekhnicheskije i komp'yuternye sistemy, Kiev, Ukraine, № 15(91), pp. 367 – 369 (In Russian). 6. *Merfi E., Sletteri K.* Vse o sintezatorakh DDS [All about synthesizers DDS], (2005), Zhurnal komponenty i tekhnologii, St-Petersburg, Russian, № 1, pp. 21 – 25 (In Russian). 7. Direct Digital Synthesis (DDS) & Modulators [Electronic resource] // Official website of the company International Rectifier. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.analog.com/ru/rfif-components/direct-digital-synthesis-dds/products/index.html#>. - Last access: 2014. – Title from the screen. 8. *Biryukov S. A.* Primenenie integral'nykh mikroskhem serii TTL [The use of integrated circuits series TTL], (1992), Moskow, Russian Federation, Patriot Publ., 117p. (In Russian). 9. *Mek R.* Impul'snye istochniki pitaniya. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu [Switching power supplies. Theoretical bases of designing and application guidance], (2008), Moskow, Russian Federation, Publishing house Dodeka XXI Publ., 272 p. (In Russian). 10. *Semenov B. Yu.* Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu [Power electronics: from simple to complex], (2005), Moskow, Russian Federation, SOLON-Press Publ., 416 p. (In Russian).

Надійшла (received) 17.12.2014